

# DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PRECIPITACIONES DIARIAS EN CHILE MEDIANTE EL ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN A RESOLUCIÓN DE 1 MM, ENTRE 1965-2005

Pablo SARRICOLEA ESPINOZA<sup>1,2</sup>, Javier MARTÍN-VIDE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Grupo de Climatología, Universidad de Barcelona*

<sup>2</sup>*Departamento de Geografía, Universidad de Chile*  
**psarricolea@uhilefau.cl, jmartinvide@ub.edu**

## RESUMEN

Chile posee una gran diversidad de climas, por causa de su amplia extensión latitudinal (17°29'57''S a 56°32' S), su contrastado relieve y los centros de acción y flujos (Anticiclón del Pacífico, Cinturón de bajas presiones subpolares, corriente en chorro, etc.). Las precipitaciones son muy dispares, entre 0,7 mm (Iquique) y 1.814,8 mm (Valdivia) como media anual entre las estaciones meteorológicas principales. Además, se concentran en poquísimos días al año, apenas 3 en el norte, de 16 a 42 días en Chile central, y más de 150 días en el sur, lo que refleja su gran variedad pluviométrica. No obstante, no se conocen bien las relaciones entre los días de precipitación y sus totales, por lo que se aplica el índice de concentración diaria (*Concentration Index*, CI) a resolución de un milímetro a 17 estaciones meteorológicas, en el período 1965-2005. Los resultados indican un elevado rango del CI (de 0,51 a 0,76), distinguiendo las áreas al norte del trópico de capricornio y al sur de los 40° S, donde la concentración es baja o moderada (< 0,60). Los valores más altos se alcanzan en La Serena (30° S), con más de 0,70, disminuyendo gradualmente hacia el norte, con 0,60 en la III región de Atacama, y hacia el sur, con el mismo valor en la VIII región de Biobío.

**Palabras clave:** Chile, Índice de Concentración, precipitación diaria, regionalización climática.

## ABSTRACT

Chile has a great diversity of climates. This diversity is produced due to its wide latitudinal distances (17° 29' 57'' S to 56 ° 32 'S), contrasting topography, atmospheric centres of action and the atmospheric flow (Southeast Pacific subtropical anticyclone, subpolar low pressure belts, Jet Stream, etc.). In average, the rainfall differs between 0.7 mm (Iquique, North) and 1,814.8 mm (Valdivia, South) according to the main meteorological stations. The little rainfall quantity in the north concentrates on very few days of the year with only 3 days per year. In the centre, it measures among 16 to 42 days and in the south more than 150 days. In order to understand the correlation between precipitation totals (grouped into 1-mm size classes) and the number of rain days, meteorologists use the *Concentration Index* (CI). This index was applied to 17 meteorological stations across Chile and produced quality data between 1965 and 2005. The results of the CI showed a high variation among the regions (from 0.51 to 0.76). The highest one was recorded in La Serena (30° S), with values higher than 0.70. From La Serena, the IC decreases gradually, reaching values of about 0.60 in the III. Atacama Region (north) and further south in the VIII. Biobío Region.

**Key words:** Chile, Concentration Index, daily precipitation, climatic regionalization.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los climas de Chile están muy controlados por factores geográficos tales como la latitud, la altitud y la influencia oceánica, entre otros. Todos ellos confieren una gran diversidad de tipos de climas, desde los más áridos del mundo (Atacama), a otros mediterráneos (o subtropicales) y, también, los de tipo templado lluvioso, marítimo lluvioso y de estepa fría. Además, el Anticiclón subtropical del Pacífico sur-oriental (APSO), prácticamente de carácter estacionario frente a las costas de Chile central, y el Monzón Sudamericano son los más importantes reguladores de los regímenes pluviométricos del país. El APSO, que posee oscilaciones de pocos grados de latitud entre el invierno y el verano, bloquea o deja paso sucesivamente a las borrascas del cinturón de bajas presiones sub-polares (CBPP). Dichas borrascas alcanzan latitudes más bajas durante el invierno, y se retraen en el verano. Ello permite entender en buena medida la pluviometría de Chile, más aún si añadimos la importancia de las teleconexiones —tales como la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), EL Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Antártica (OA)—, que permiten explicar la variabilidad interanual y estacional de las precipitaciones a lo largo y ancho de Chile.

Sin embargo, hasta ahora los esfuerzos de la Climatología analítica, han estado orientados casi en exclusiva a establecer medias mensuales y anuales, dejando fuera la información diaria (e incluso horaria). En este sentido, la información climática a nivel diario, posee una gran riqueza para caracterizar las precipitaciones. A la vez, trabajar a dicha resolución es un desafío en términos de acceso y magnitud de procesamiento de datos, pues conlleva tratar grandes bases de datos (más de 10.950 registros en una serie diaria de 30 años).

Es sabido que un monto o promedio mensual de lluvia suministra información valiosa sobre la pluviometría de un territorio, pero no nos dice nada acerca de la frecuencia o número de días de lluvia, ni tampoco del desglose de la cantidad registrada en los días lluviosos. La variabilidad temporal de las precipitaciones ha sido usualmente calculada y resumida a nivel mensual y anual en las series climáticas mediante estadígrafos. Por citar algunos, el rango, la varianza, el coeficiente de variación (CV), la desviación estándar y, más recientemente, por el índice de irregularidad temporal ( $S_1$ , propuesto por Martín-Vide *et al.*, 2001). Este último índice considera, a diferencia de los antes mencionados, el orden de los valores en la serie. Sin embargo, cabe hacer notar que todos estos parámetros estadísticos que expresan la variabilidad de las precipitaciones se aplican casi siempre sobre montos mensuales o anuales, raramente a nivel diario.

Por lo tanto, es a partir del problema de conocer de manera detallada (alta resolución) cómo se distribuye la precipitación, que surgen soluciones de carácter bidimensional. Ellas, no sólo consideran los totales pluviométricos, sino que, también, el número de días en que se registran. En este sentido, se ha llegado a una solución similar al coeficiente de Gini, que es utilizado habitualmente para establecer y evaluar la desigualdad en la distribución del ingreso económico entre personas de los países (o bien, otra variable cuya distribución no sea uniforme, como las precipitaciones). Para graficar el coeficiente de Gini se han usado mapas (con valores de 0 a 1), y, también, la curva de Lorenz.

Basado en el conocimiento del coeficiente de Gini, Martín-Vide (1984) formuló el índice de concentración (CI o *Concentration Index*, en adelante), específicamente, para el estudio de las precipitaciones diarias del litoral mediterráneo español. El CI es un indicador sintético que permite calcular el grado de concentración de las precipitaciones. Además, el CI es un estimador del grado de agresividad o torrencialidad pluviométrica. Sus resultados han sido ampliados a toda la Península

Ibérica (Martín-Vide, 2004; Sánchez-Lorenzo y Martín-Vide, 2006), con resultados que revelan una alta concentración diaria de las precipitaciones en la fachada oriental de la Península Ibérica (0,63 a 0,70), siendo las concentraciones moderadas (<0,58), en el resto del territorio. Para Chile, a partir de estos resultados, se ha formulado la siguiente hipótesis: “En las regiones que poseen un clima de carácter mediterráneo las concentraciones han de alcanzar valores altos, mientras que hacia el sur de Chile, que posee un clima más lluvioso, oceánico, los valores del CI deberán ser más bien modestos”.

Sin embargo, sólo considerando la Península Ibérica no se puede plantear una hipótesis sobre los posibles valores del CI en el norte de Chile, pues su clima es árido y semiárido. No obstante, al estudio de la pluviometría diaria mediante el CI se han sumado otras regiones planetarias. En Irán (Alijani *et al.*, 2007), que posee climas con montos pluviométricos similares al norte de Chile, encontramos valores de CI más altos que los registrados en climas mediterráneos de España (>0,70), por lo que se podría esperar que en el norte de Chile se incremente la concentración de las precipitaciones.

Asimismo, encontramos en la bibliografía que el CI se ha aplicado recientemente en China. Zhang *et al.* (2009) lo han calculado para las dos regiones litorales del sur de China (entre los 22° y 26° N), próximo al trópico de cáncer. Los resultados son llamativos, pues el índice de concentración alcanza valores mayores de 0,78. Para otras regiones de China, Li *et al.* (2011) han regionalizado pluviométricamente Xinjiang usando el CI. La región de Xinjiang posee, entre sus singularidades, una gran continentalidad, y el relieve con las mayores diferencias del mundo entre su lugar más bajo y el más elevado (-156 hasta 8.058 m), registrando valores entre 0,58 y 0,70, quedando los máximos de CI en las estaciones meteorológicas que poseen precipitaciones anuales menores a 81 mm, y altitudes entre 800 y 1.500 m.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con un total de 17 estaciones meteorológicas, distribuidas por el territorio continental de Chile, y para un período de 41 años (1965 a 2005). Los datos de precipitación se obtuvieron a nivel diario. Todas ellas corresponden a estaciones oficiales de la Dirección Meteorológica de Chile.

En primer lugar, se calcularon para cada estación (a resolución anual), la media, la desviación típica, el coeficiente de variación (CV), el índice de irregularidad temporal ( $S_1$ ) y el número (y porcentaje) de días de lluvia al año. En el caso de  $S_1$  se considera la secuencia de los datos en serie, tal como advierte Martín-Vide (2003). El  $S_1$  se construye según la expresión:

$$(1) \quad S_1 = (1/(n-1)) \sum \left| \ln(P_{i+1}/P_i) \right|$$

siendo  $P_i$  la precipitación del año  $i$ .

Cabe señalar que un  $S_1$  alto es característico del clima mediterráneo de la Península Ibérica.

Para la obtención del índice de concentración, se ha trabajado con la serie a resolución diaria. A partir de la base de datos, se han agrupado las precipitaciones en clases de 1 mm, y se ha procedido a contar el número de días de lluvia de cada clase y estación. El CI es un valor entre 0 y 1, y se relaciona con el área entre la curva del ajuste exponencial y la diagonal del cuadrado de lado 100 o 10.000 unidades de área. En concreto, el CI se calcula como la proporción de la citada área bajo la diagonal ( $S'/5.000$ ), y para obtenerla se debe conocer el área inferior a la curva exponencial ( $A'$ ).

Dicho ajuste exponencial expresa el porcentaje de días de lluvia y sus totales, ambos acumulados. En la figura 1 se puede ver geométrica y matemáticamente la expresión del CI, omitiendo el cálculo de de las constantes (a y b), lo que se puede revisar en Martín-Vide (2004).

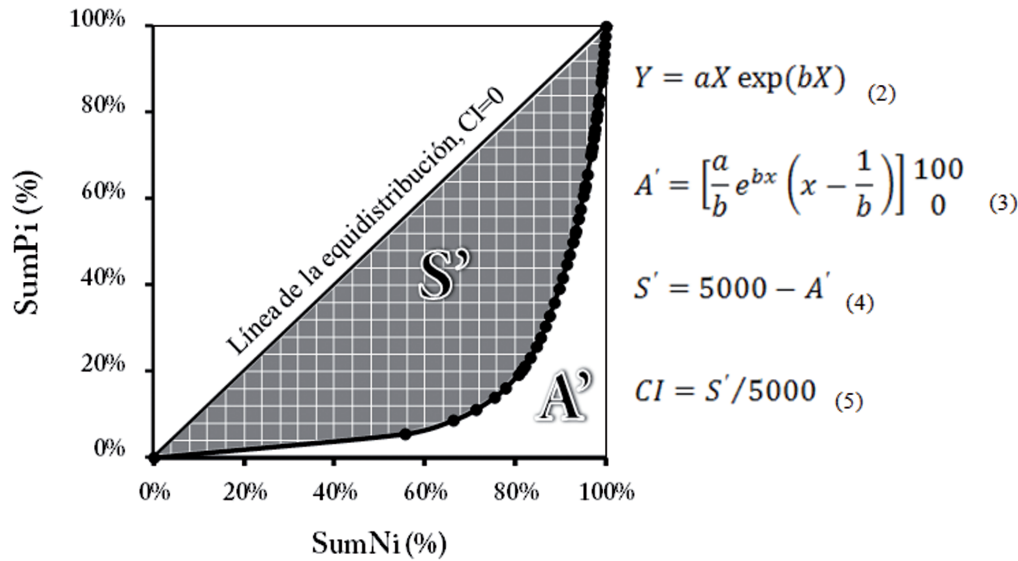


FIG. 1: Ajuste exponencial del porcentaje acumulado del número de días de lluvia y el porcentaje acumulado de las cantidades aportadas por ellos, y expresiones para el cálculo del índice de concentración, según Martín-Vide (2004). Elaboración propia.

Para graficar el CI se han realizado figuras de las curvas en Microsoft Excel, y mapas de la distribución espacial del CI, CV y  $S_1$  en el *software* Arc-Gis 9.3.1.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis pluviométrico de las estaciones meteorológicas escogidas

Existe un marcado aumento de los montos de precipitación desde Arica a Puerto Montt, aunque ambas estaciones no son los extremos pluviométricos (ver tabla 1). Desde los 42° S los totales de precipitación decaen, alcanzando los 390,5 mm en Punta Arenas. Además, es posible advertir que Santiago, Osorno y Balmaceda, estaciones localizadas hacia el interior, presentan cantidades menores a las estaciones de su misma latitud, pero costeras o más próximas al litoral, como Valparaíso, Valdivia y Coyhaique.

Respecto a los coeficientes de variación (CV), se observa que al norte de Chillán sus valores son bastante altos (por encima de un 27%), destacando Iquique con 301%, aunque influido por sólo 0,7 mm como precipitación media anual. Más al sur, se encuentran CV modestos, destacando Temuco, Valdivia y Osorno, con 18%, y Puerto Montt, con un 16%. Al revisar el índice de irregularidad temporal ( $S_1$ , en la tabla 1) se ve cómo sus valores se correlacionan bastante bien con el CV, con la excepción de las cinco estaciones meteorológicas del norte. Estas poseen altos valores de CV ( $\geq 73\%$ ), pero dado que precipita muy poco al año, el  $S_1$  es bajo, siendo el caso más notable el de Iquique, con un  $S_1$  de 1,7%.

La pauta espacial anterior se aprecia reforzada con el número y porcentaje de días de lluvia al año (considerando día de lluvia el que registra un monto igual o superior a 0,1 mm). Hay un aumento de los días de lluvia desde Arica hasta Puerto Montt, desde menos de 2 días a casi 220 días de lluvia al año, para luego bajar levemente hacia Punta Arenas, que posee 150 días al año. Y respecto la estacionalidad de las precipitaciones, destaca el régimen invierno, otoño, primavera y verano (IOPV). Difieren de este régimen Arica e Iquique, por las precipitaciones de verano, Copiapó, por las lluvias de primavera, y Punta Arenas, con un máximo otoño.

Estación	Latitud (° S)	Altitud (m)	Media anual (mm)	Desv. típica	CV	S <sub>1</sub>	N° días de lluvia al año	% de días de lluvia al año	Régimen
Arica	-18,33	58	1,5	2,1	139%	66,3%	1,88	0,5%	IVOP
Iquique	-20,53	52	0,7	2,2	301%	1,7%	0,51	0,1%	IOVP
Antofagasta	-23,68	30	4,6	5,2	111%	72,0%	2,44	0,7%	IPOV
Copiapó	-27,30	291	16,4	24,1	147%	94,9%	2,88	0,8%	IOPV
La Serena	-29,90	142	78,7	57,2	73%	102,7%	16,02	4,4%	IOPV
Valparaíso	-33,02	41	411,8	191,7	47%	65,3%	33,46	9,2%	IOPV
Santiago	-33,43	520	330,0	159,2	48%	69,6%	39,42	10,8%	IOPV
Curicó	-34,97	228	722,9	270,0	37%	53,0%	54,15	14,8%	IOPV
Chillán	-36,63	124	1083,4	288,2	27%	41,7%	86,61	23,7%	IOPV
Concepción	-36,78	15	1127,4	256,0	23%	36,4%	102,56	28,1%	IOPV
Temuco	-38,75	114	1175,4	216,5	18%	28,6%	148,66	40,7%	IOPV
Valdivia	-39,62	19	1814,8	324,0	18%	28,1%	174,12	47,7%	IOPV
Osorno	-40,60	65	1330,3	236,5	18%	25,7%	171,46	47,0%	IOPV
Puerto Montt	-41,42	85	1724,3	276,3	16%	22,6%	219,83	60,2%	IOPV
Coyhaique	-45,58	310	1103,3	322,6	29%	22,0%	171,51	47,0%	IOPV
Balmaceda	-45,92	520	595,6	144,0	24%	26,3%	124,05	34,0%	IOPV
Punta Arenas	-53,00	37	390,5	83,4	21%	30,6%	150,20	41,1%	OVIP

TABLA 1: Estadísticas de las precipitaciones de las estaciones analizadas. Elaboración propia.

\* I=invierno, P=primavera, V=verano y O=otoño.

### 3.1. Concentración de las precipitaciones mediante el CI

La concentración diaria de la precipitación estudiada mediante el CI refleja que las estaciones de Arica, Antofagasta, Iquique y Puerto Montt presentan valores menores o iguales que 0,57 (ver figura 2). Resulta curioso el caso de las tres estaciones del norte de Chile, pues dichos CI van acompañados de escasas precipitaciones. Mientras que en el caso de Puerto Montt llueve más del 60% de los días del año, y en promedio unos 1.724,3 mm.

El CI alcanza sus máximos valores en La Serena (0,76), seguido de Copiapó (0,68), Valparaíso (0,64) y Santiago (0,63). En resumen, podemos decir que el CI máximo se consigue en Chile central, justamente donde el clima es mediterráneo y gran parte de las lluvias se concentran en unos pocos días. A partir de Chile central, el CI decrece a las áreas desérticas del norte y templadas lluviosas del sur. En el caso de las estaciones de clima lluvioso (templado y marítimo), sucede que la precipitación se reparte en muchos días del año.

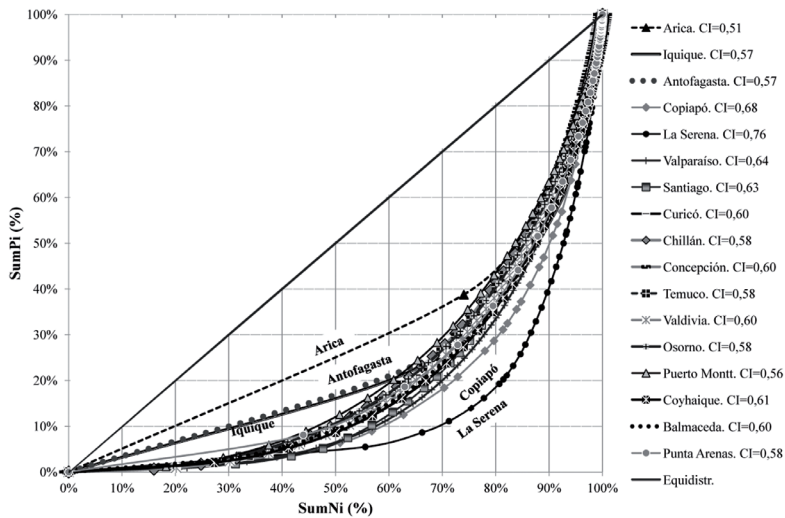


FIG. 2: Curvas de concentración de las 17 estaciones meteorológicas analizadas para Chile entre 1965 y 2005. Elaboración propia.

Curiosamente, las regiones de clima más árido poseen un CI bajo, a pesar de que llueve unos pocos días al año, y la lluvia se concentra forzosamente en ellos. El CI fue ideado para discriminar regiones en las cuales la precipitación está bien repartida versus regiones donde en unos pocos días llueve una buena cantidad. Pero nos encontramos con que el CI parece “no funcionar” bajo ciertos umbrales, por ejemplo para aquellas regiones donde la primera clase es muy frecuente y aglutina más de un 20% de las precipitaciones, tal como es el caso de Arica, Iquique y Antofagasta, que se muestran en las tablas 2, 3 y 4.

Clases	Punto medio	$n_i$	$\sum n_i$	$p_i$	$\sum p_i$	$\sum n_i (\%) = X$	$\sum p_i (\%) = Y$
0,1 - 0,9	0,5	57	57	28,5	28,5	74%	39%
1 - 1,9	1,45	12	69	17,4	45,9	90%	62%
2 -	2,9	2,45	6 75	14,7	60,6	97%	82%
4 - 4,9	4,45	1	76	4,45	65,05	99%	89%
8 - 8,9	8,45	1	77	8,45	73,5	100%	100%

TABLA 2: Distribución de frecuencias en clases de 1 mm, frecuencias porcentuales acumuladas de días (X) y porcentajes de precipitación correspondientes (Y) para Arica en el período 1965-2005. Elaboración propia.

Clases	Punto medio	$n_i$	$\sum n_i$	$p_i$	$\sum p_i$	$\sum n_i (\%) = X$	$\sum p_i (\%) = Y$
0,1 - 0,9	0,5	13	13	6,5	6,5	62%	21%
1 - 1,9	1,45	4	17	5,8	12,3	81%	40%
2 - 2,9	2,45	2	19	4,9	17,2	90%	55%
4 - 4,9	4,45	1	20	4,45	21,65	95%	70%
9 - 9,9	9,45	1	21	9,45	31,1	100%	100%

TABLA 3: Distribución de frecuencias en clases de 1 mm, frecuencias porcentuales acumuladas de días (X) y porcentajes de precipitación correspondientes (Y) para Iquique en el período 1965-2005. Elaboración propia.

Clases	Punto medio	$n_i$	$\sum n_i$	$p_i$	$\sum p_i$	$\sum n_i (\%) = X$	$\sum p_i (\%) = Y$
0,1 - 0,9	0,5	64	64	32	32	64%	23%
1 - 1,9	1,5	20	84	30	62	84%	44%
2 - 2,9	2,5	5	89	12,5	74,5	89%	53%
3 - 3,9	3,5	4	93	14	88,5	93%	63%
4 - 4,9	4,5	4	97	18	106,5	97%	76%
9 - 9,9	9,5	2	99	19	125,5	99%	90%
14 - 14,9	14,5	1	100	14,5	140	100%	100%

TABLA 4: Distribución de frecuencias en clases de 1 mm, frecuencias porcentuales acumuladas de días (X) y porcentajes de precipitación correspondientes (Y) para Antofagasta en el periodo 1965-2005. Elaboración propia.

Respecto a la representación espacial, en la figura 3 se muestra cómo La Serena marca el máximo CI, formando un núcleo desde el cual las isopletas se disponen de manera zonal hasta cerca de Curicó; a partir de ahí, y hasta Puerto Montt, la disposición de las isopletas es meridiana, con valores de CI más bajos en el interior. Desde Puerto Montt (que posee la menor concentración del sur de Chile, con un CI de 0,56) al sur las isopletas recuperan su disposición zonal.

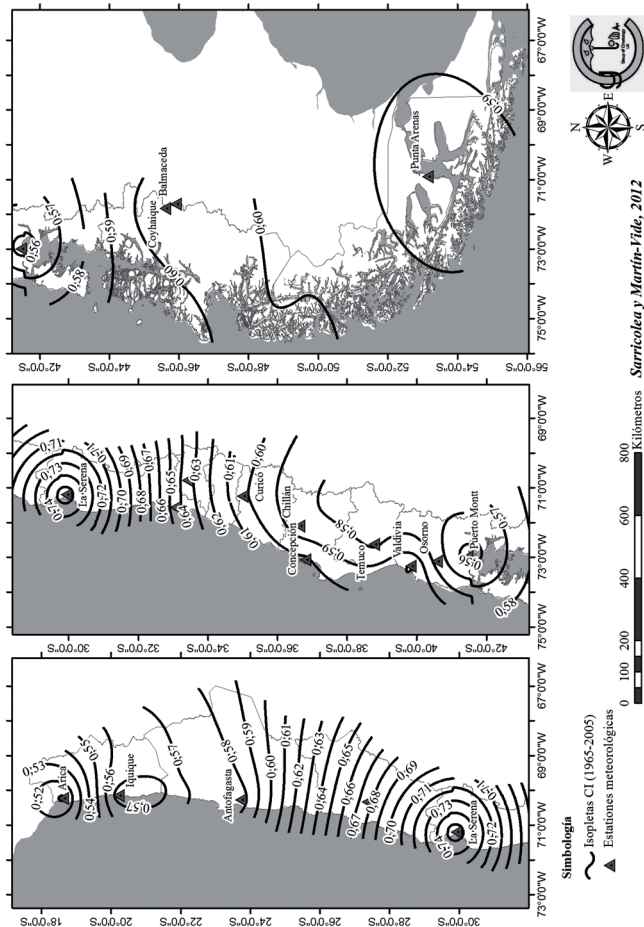


FIG. 3: Índice de concentración de las precipitaciones de Chile entre 1965 y 2005. Elaboración propia.



4. CONCLUSIONES

La concentración de las precipitaciones diarias obtenidas mediante el CI confirma para Chile central y sur una configuración similar a la de la Península Ibérica, es decir, un alto CI para climas mediterráneos y valores moderados y bajos para climas lluviosos.

No obstante, para climas desérticos, se da una realidad diferente a la hallada para dichos tipos de climas en Irán y China, donde existen altas concentraciones de la precipitación, con CI mayores a 0,70. En el caso de Chile, los CI de las regiones costeras del norte donde llueve menos de 5 mm al año son muy bajos ( $\leq 0,57$ ). La causa está en que la primera clase (0,1 a 0,9 mm) acoge más del 50% de los días lluviosos, que acumulan más del 20% de la cantidad de lluvia total, lo que desvirtúa la curva de concentración aproximándola a la recta de equidistribución (Fig.2), lo que da un CI muy bajo.

Además, desde La Serena al sur hay una alta y positiva correlación entre CI y CV ( $R^2$  de 0,876 y un  $p$ -value de 0,0000) y entre CI y  $S_1$  ( $R^2$  de 0,802 y un  $p$ -value de 0,0001), lo cual refleja coherencia espacial de dichos índices con los climas mediterráneos y lluviosos. Más al norte (climas desérticos) es necesario buscar otros tipos de análisis, pues es una realidad extremadamente anómala, por seca, desde el punto de vista estadístico.

Por lo tanto, Chile puede ser regionalizado climáticamente en tres zonas: Una zona desértica, de baja concentración de las precipitaciones, pero con un muy alto CV ( $> 100\%$ ); una región mediterránea con unos elevados CI y CV (este entre 23 y 73%), y, finalmente, una zona lluviosa de bajo CI y CV, tal como se aprecia en la figura 4.

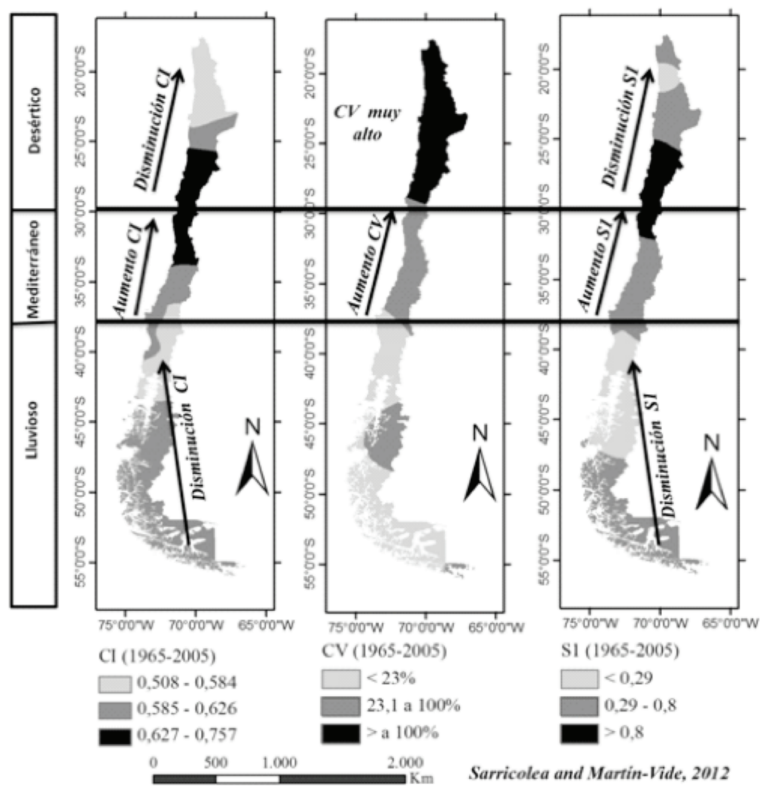


FIG. 4: Regionalización climática de Chile a partir del CI, CV y  $S_1$ . Elaboración propia.



### Agradecimientos

Uno de los autores (Pablo Sarricolea) agradece al Grupo de Climatología de la Universidad de Barcelona por integrarle en el grupo y ayudarlo en su formación como investigador; al Gobierno de Chile por concederle la beca predoctoral Presidente de la República, administrada por la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICYT), y al Departamento de Geografía de la Universidad de Chile por facilitar su comisión de estudios en Barcelona entre 2008 y 2012. El trabajo se inserta también en el proyecto CGL2011-29263-C02-01 (Ministerio de Economía y Competitividad, España) y en el marco del Grupo de Climatología 2009 SGR 443 (Generalitat de Catalunya).

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alijani, B. J., O'Brien, Yarnal, B. (2007). "Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran". *Theoretical and Applied Climatology*, 94: 107–124.
- Li, X., Jiang, F., Li, L., Wang, G. (2011). "Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China". *International Journal of Climatology*, 31: 1679–1693.
- Martín-Vide, J. (1984). "Análisis de la irregularidad de la precipitación diaria en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica". *Revista de Geofísica*, 40, 1, 101–106, Madrid.
- Martín-Vide, J., Prohom, M., Bohigas, M., Peña J., Esteban P., y Montserrat D. (2001). "Índices de irregularidad temporal y dimensión fractal de la precipitación anual en España". A: Pérez-Cueva, López Baeza, Tamayo (eds.). *El Tiempo del Clima*. Buñol, AEC i Garma Impresores. págs. 157–166, 2001.
- Martín-Vide, J. (2004). "Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain". *International Journal of Climatology*, 24: 959–971.
- Martín-Vide, J. (2003). "El tiempo y el clima". *Colección Cuadernos de Medio Ambiente*. Rubes Editorial. Barcelona, España. 127 pág.
- Sánchez-Lorenzo, A. y Martín-Vide, J. (2006). "Distribución espacial de la concentración pluviométrica diaria en la Península Ibérica". *Proceedings 5ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, sesión Climatología y Cambio Climático (CDROM).
- Zhang, Q., Xu C-Y., Gemmer M., Chen YQ., Liu C-L. (2009). "Changing properties of precipitation concentration in the Pearl River basin, China". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23: 377–385.

